

## 水声多径信道中的标识延迟空时扩展发射分集

张 歆 张小蓊

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

**摘 要:** 水声信道存在严重的传播时延和多径时延, 该文提出了一种带有信道标识的延迟空时扩展(LDSTS)发射分集方案, 通过信道探测、延时发射和Rake接收来消除传播时延和多径时延的影响, 且顺序延时发射保证了方案的实用性。文中给出了采用频移键控和相移键控调制的LDSTS方案的信号模型、误码率分析和比特误码率的仿真。仿真表明, 在多径水声信道中, LDSTS可以更好地实现完全发射分集。

**关键词:** 水声通信; 发射分集; 标识延时空时扩展; 多径信道; 传播时延

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-2024-04

## A Transmitter Diversity Scheme Based on Labelled Delay Space Time Spreading in Underwater Acoustic Communication Systems

Zhang Xin Zhang Xiao-ji

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A transmit diversity scheme, called Labelled Delay Space-Time Spreading (LDSTS) is proposed for communication systems in underwater acoustic(UWA) channels with propagation delays and multipath spreading. The scheme eliminates the propagation delays and multipath delays by using the channel probe signals, transmitted in sequence and Rake receivers. The signals are transmitted from transducers in sequence enable the scheme is practice for applications to UWA communication system. The signal models are proposed and BER performances of the scheme with FSK and PSK modulation are analyzed. Simulations results show that the scheme realizes complement transmit diversity gains in multipath UWA channel.

**Key words:** UnderWater Acoustic(UWA) communication; Transmitter diversity; Labelled Delay Space-Time Spreading (LDSTS); Multipath channel; Propagation delays

### 1 引言

近年来, 随着自主水下航行器(AUV)和 underwater 网络技术的发展, 大容量水声通信技术的研究受到越来越多的关注。水声通信是一种借助于声波传播的特殊无线通信技术, 为了在时变、多径的水声信道中高速、可靠地传输, 抗信道衰落、抵消码间干扰和带宽有效的通信技术是研究工作的重点<sup>[1, 2]</sup>。

发射分集技术可以在不增加带宽的情况下显著提高信道容量<sup>[3, 4]</sup>, 这对严重带限的水声信道非常有吸引力。但在水声信道中采用发射分集, 必须要解决水声信道的多径扩展和不同传播路径之间传播时延的影响。大多数水声信道中存在几十毫秒以上的多径时延和传播时延, 会造成分集性能下降。

考虑到上述限制并利用信道中存在传播延时的特点, 本文提出了一种带有信道标识的、延时顺序发射的空时扩展发射分集方案, 简称标识延迟空时

扩展(Labelled Delay Space-Time Spreading, LDSTS)方案, 该方案利用空时分组编码(STBC)形成相互正交的发射序列, 用扩频序列对发射系列进行扩展; 借助于信道探测信号来标识各路径的发射时延和传播时延, 消除其影响, 并获得信道参数的估计; 利用顺序发射减少和功放电路的使用, 解决发射分集技术在水声通信载体上的实用问题, 同时减少多径的干扰, 通过 STBC 的最大似然译码和 Rake 接收同时获得发射分集和多径分集, 改善系统性能。

在以后的各节中, 本文首先介绍标识延迟空时扩展(LDSTS)方案的信号模型和性能分析, 考虑到频移键控(FSK)调制在水声通信中的广泛应用, 本文同时分析了采用相移键控(PSK)和 FSK 调制的 LDSTS 方案的性能, 最后给出在水声信道模型中的性能仿真结果。

### 2 标识延迟空时扩展方案的分析

为简化分析, 考虑采用  $M = 2$  个发射换能器,  $N = 1$  个接收换能器的 LDSTS 系统。设要发射的信

息为实数序列  $\{b_i\}$ , 对其采用 Alamouti 空时分组编码(STBC)后, 形成相互正交的两路信号, 这两路信号用长度为  $\{N_c\}$  的二进制扩频序列  $c$  进行扩展, 扩频信号和信道探测信号一起组成发射信号, 从两个换能器顺序发射, 相邻换能器之间的发射时延为  $D$ 。例如, 当  $M = 2$  时, 两路发射的基带信号可以表示为

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt{p/2}[b_1 & D & -b_2 & D]c \\ x_2 = \sqrt{p/2}[D & b_2 & D & b_1]c \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $c$  为扩频序列,  $\{b_1\}$ ,  $\{b_2\}$  分别为经 STBC 得到的奇数和偶数周期的子序列,  $p$  为信号功率, 每路信号用  $\sqrt{1/2}$  进行归一化, 以使两发射时总发射功率与单发射时相同,  $D$  为发射延时, 通常为符号周期  $T$  的整数倍。假设系统采用 BFSK 调制, 则发射信号可以表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^2 x_i(t) \cos[2\pi f_i t + \theta_0(t)] \quad (2)$$

式中,  $\theta_0(t)$  为调制器的初始相位, 不失一般性, 可令  $\theta_0(t) = 0$ ,  $f_i$  为载波频率, 表示为

$$f_i = \begin{cases} f_c + \Delta f, & x_i = 1 \\ f_c - \Delta f, & x_i = 0 \end{cases}; \quad iT \leq t < (i+1)T$$

$\Delta f$  为 FSK 载波频率间隔的一半,  $f_c$  为中心频率。接收机通过信道探测信号消除了接收信号中的发射时延和传播时延, 接收信号表示为

$$\begin{aligned} r(t) = & \sqrt{\frac{p}{2}} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^2 |h_{il}| |c(t - \tau_{il}) b_i \\ & \cdot \text{Re}\{\exp[j2\pi f_i(t - \tau_{il}) + \theta_{il}]\} + \gamma(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $|h_{il}(t)|$ ,  $\tau_{il}(t)$ ,  $\theta_{il}(t)$  分别为从第  $i$  个发射换能器到接收换能器之间信道的第  $l$  条多径的幅度衰减系数、传播时延和相移,  $i=1, 2, L$  为所有发射到接收之间信道的最大信道长度。 $\gamma$  为零均值, 单边谱密度为  $N_0/2$  的加性白高斯噪声分量。利用信道标识可以对来自不同信道的信号分别进行 Rake 接收, 按照文献[5]对 DSSS-FSK 的解调方法, 可得到第  $i$  个发射的第  $l$  条路径的输出为

$$d_i(l) = \sqrt{2pT_b} |h_{il}| e^{j\theta_{il}} b_i + \mu_i(l) + z_i(l) \quad (4)$$

式中,  $T_b$  是比特间隔,  $\mu_i(l)$ ,  $z_i(l)$  分别表示每一分支上的多径项和噪声分量, 表示为

$$\begin{aligned} \mu_i(l) = & \sqrt{\frac{p}{2}} \sum_{m=1}^L \int_{\tau_l}^{2T_b + \tau_l} c(t - \tau_{il}) c^*(t - \tau_{im}) dt |h_{il}| e^{j\theta_{il}} b(i) \\ = & \sqrt{2pT_b} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^L R_{im} |h_{il}| e^{j\theta_{il}} b_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$z_i(l) = \left( \int_{\tau_{il}}^{2T_b + \tau_{il}} \gamma_i(t) c^*(t - \tau_{il}) dt \right) \quad (6)$$

在式(5)中令  $\int_{\tau_{il}}^{2T_b + \tau_{il}} c(t - \tau_{il}) c^*(t - \tau_{im}) dt = R_{im}$ , 表示为扩展码的相关函数,  $c^*$  表示扩频序列  $c$  的共轭。假设信道状态信息在接收机是已知的, 采用最大比合并, 则统计判决变量表示为

$$\begin{aligned} \tilde{d}_i = & b_i \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^2 \sqrt{2pT_b} |h_{il}|^2 \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^2 |h_{il}| e^{-j\theta_{il}} [\mu_m(l) + z_m(l)] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可分别对子序列  $b_1$ ,  $b_2$  进行独立的最大似然译码。

假设不同路径的  $h_{il}$  是独立同分布(iid)的复高斯过程, 且设每条路径有相同的均值和方差,  $E\{|h_{il}|^2\} = 1$ 。为了简化分析, 假设多径项  $\mu_i(l)$  和噪声项  $z_i(l)$  也是统计独立的、同分布的高斯变量, 且对所有的信道都相同。于是, 按照式(7), 在  $M = 2$  个发射、一个接收时, 一个符号内接收的瞬时信号与噪声加干扰比为

$$\begin{aligned} \text{SNR} = & \frac{E_b / N_0}{2E_b / N_0 \sum_{m=1}^L \sum_{i=1}^2 R_{im} E(|h_{il}|^2) + 1} \\ & \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^2 |h_{il}|^2 = r_0 \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^2 |h_{il}|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $r_0 = \frac{E_b / N_0}{2E_b / N_0 \sum_{m=1}^L \sum_{i=1}^2 R_{im} E(|h_{il}|^2) + 1}$  为 Rake

接收机中每分支的平均信号噪声干扰比, 按照文献[6], 与单发射, 未采用 Rake 接收的系统相比, LDSTS 系统可获得  $2L$  重分集, 在瑞利 iid 衰落信道, 获得  $2L$  重分集并采用非相干检测的 BFSK 调制的平均差错概率为

$$\begin{aligned} P_e = & \frac{1}{2^{2L-1} (2L-1)! (2+r_0)^{2L}} \\ & \cdot \sum_{j=0}^{2L-1} m_j (2L-1+j)! \left( \frac{r_0}{2+r_0} \right)^j \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $m_j = (1/j!) \sum_{n=0}^{2L-1-j} \binom{4L-1}{n}$ 。采用 BPSK 调制的系统的平均差错概率为

$$P_e = \left[ \frac{1}{2} (1-r) \right]^{2L} \sum_{j=0}^{2L-1} \binom{4L-1+j}{j} \left[ \frac{1}{2} (1+r) \right]^j \quad (10)$$

式中  $r = \sqrt{r_0 / (1+r_0)}$ 。

### 3 仿真分析

本文对 LDSTS 方案的性能进行了仿真分析。

水声信道是用射线模型仿真的 200 m 水深、传播距离  $R = 70$  km 的信道,其参数如表 1 所示,SD, RD 分别表示发射、接收水深,表中用最先到达路径的参数对其它路径参数进行了归一化。在表 1 中,4 条路径的多径时延在 0.7~354.7 ms 之间,传播时延在 7.3~38.9 ms 之间,传播时延与多径时延有相同的数量级。

发射序列为随机二进制码,扩频序列采用 32 位  $m$  序列;采用 BFSK 调制,载波频率为 2 kHz、3 kHz,信道探测信号采用频宽为 1~3 kHz 线性调频信号。两发射、一接收时,换能器发射深度分别为 92.5 m 和 96 m。发射延时为一个符号宽度,采用蒙特卡罗仿真,测试数据为  $2 \times 10^4$ 。在两发射、一接收时的仿真时,对比了两种 chip 速率 ( $R_c = 1$  kbps 和 500 bps) 搜 LDSTS、不带延时的空时扩展(STS)<sup>[3]</sup>、单发射 DSSS 方案的比特误码率(BER),仿真结果如图 1 所示。

图 1 中,在达到  $10^{-2}$  误码率时,当  $R_c = 500$  bps 时,  $M = 2$  时,LDSTS 相比单发射有近 2.5 dB 的信噪比增益;  $M = 4$  时,LDSTS 有 6 dB 以上的增益,实现了完全发射分集。当  $R_c = 1$  kbps 时,单发射的 BER 曲线接近发散,而 LDSTS 的 BER 曲线正常。这说明,LDSTS 方案有更好的抗多径性能。图 1 中,无延迟的 STS 方案的性能略差于单发射的性能,其原因在于理论分析时,假设扩频码有理想

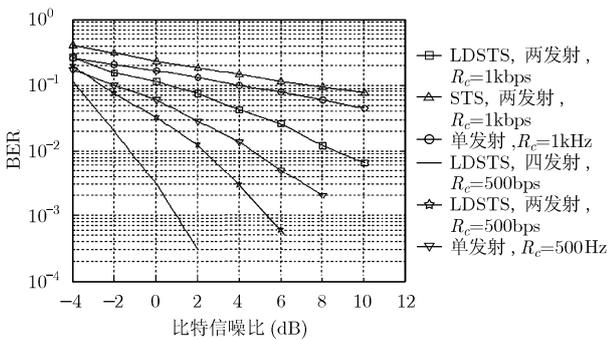


图 1 LDSTS 与 STS 的 BER

的相关特性,而实际中,特别是在多径环境中,式 (4) 中多径项  $\mu_i(t)$  的影响不能忽略,STBC 的正交性受到影响,译码时性能下降。在文献[3]的仿真中,两发射的 STS 方案的 SNR 要比单发射时损失 3.7 dB。本文的方案带有信道标识,有助于识别来自不同信道的信号,减少非正交性的影响。而且在 LDSTS 方案中,由于延时,各发射信号在不同的时间到达接收机,相互间的干扰大大降低,因而性能更好。

图 2 中给出了当接收机未知信道状态信息,通过信道探测信号估计信道参数时的 LDSTS 的性能,分别给出了采用 BFSK 调制(LDSTS-FSK)和 BPSK 调制(LDSTS-PSK)时的 BER 曲线。由图可见,有信道估计误差时,LDSTS-FSK 的分集增益几乎无损失;在达到  $10^{-2}$  误码率时,LDSTS-PSK 比 LDSTS-FSK 有约 6 dB 的信噪比增益,但在有信道估计误差时,有约 1.3 dB 的增益损失,当四发射时,增益损失达到 3 dB,这说明 LDSTS-FSK 更稳健。

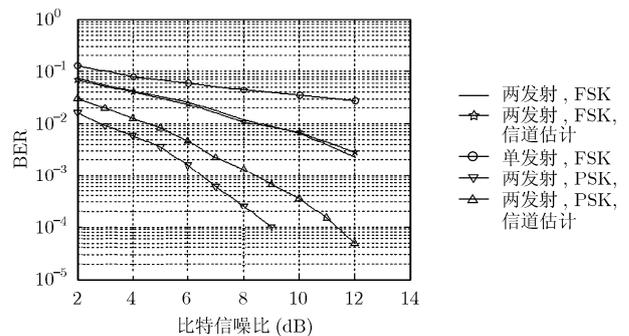


图 2 信道估计时 LDSTS 的 BER

### 4 结论

从以上理论模型和仿真分析可以看到,在有传播时延和多径时延的水声信道中,无论是采用 FSK 调制还是采用 PSK 调制,本文所提出的标识延迟空时扩展方案可以获得完全的发射分集,这种分集带来的信噪比改善可以用来增加系统的传输距离或提高系统的传输速率。

表 1  $R = 70$  km,  $RD = 106$  m 时的信道参数

SD (m)		相对衰减系数				时延(ms)			
92.5	0.97	0.37	0.83	0.62	25.6	28.3	48.0	61.2	
	0.46	0.54	0.55	0.48	72	125.3	196.7	210.4	
96	0.94	0.93	0.96	0.88	7.3	8.0	18.0	68.5	
	0.94	0.93	0.96	0.88	83.9	205.7	324.5	362	
101	1.0	1.0	1.02	0.53	0	48.6	49.1	154.2	
104.5	0.67	0.81	1.38	1.40	38.9	39.5	47.6	94	
	0.67	0.81	1.38	1.40	104.5	222.9	257.3	314.2	

与没有发射延时的空时扩展方案相比, 本方案接收的信号有延时, 且随着发射换能器的数量增加, 延时也随着增加, 但从仿真结果看, 这种不同发射之间的延时可以明显减少多径的影响。

延时空时扩展(DSTS)方案很适合无法采用接收分集或远距离传输的水声通信系统。如果在发射、接收系统中同时采用分集技术, 则水声通信系统的性能将会得到进一步的改善。

多发射技术对于水声通信是一种全新概念, 有效的发射分集方案将为水声通信系统的性能提高提供一种新思路。

### 参 考 文 献

- [1] Kilfoyle D B and Baggeroer A. The state of the art in the underwater acoustic telemetry[J]. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 4-27.
- [2] 朱维庆, 朱敏等. 水声高速图像传输信号处理方法[J]. *声学学报*, 2007, 32(5): 385-397.
- [3] Hochwald B, Marzetta T L, and Papadias C B. A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading[J]. *IEEE J Selected Areas in Communications*, 2001, 19(1): 48-60.
- [4] Gyawali T, Vaidya S R, and Kwon H K. Complex spreading for STBC/DSTBC under frequency selective fading[A]. *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, Los Angeles, 26-29 Sept. 2004, Vol. 5: 3817-3821.*
- [5] 张歆, 彭记肖, 李国梁. 采用FSK调制的直接序列扩频水声通信技术[J]. *西北工业大学学报*, 2007, 25(2): 177-180.
- [6] Proakis J G著, 张力军等译. 数字通信(第四版). 北京: 电子工业出版社, 2003, 第14章.

张 歆: 女, 1963年生, 副教授, 研究方向为水声通信、通信信号处理.

张小蓟: 男, 1958年生, 副教授, 研究方向为水声工程、水声信号处理.